

## 国内外水体及底泥中 PFOS 污染物污染状况

孙 瑞, 吴明红, 徐 刚, 刘 宁  
(上海大学 环境与化学工程学院, 上海 200444)

**摘要:** 全氟辛烷磺酸 (perfluorooctane sulphonate, PFOS) 类物质是随人类活动而出现的新型持久性有机污染物, 其污染在世界各地均有检出. PFOS 由含氟污水厂排放污水、工业生产 PFOS 物质或前体、大气沉降等方式进入环境中, 主要分布于水体以及底泥中. 水体中 PFOS 污染主要发生在人口密集、工业发达区域以及污水处理厂周边. 底泥中 PFOS 的吸附量影响因素有 pH 值、阴阳离子表面活性剂及盐浓度. 通过调研现阶段国内外有关 PFOS 的文献, 综述 PFOS 在水体及底泥环境中的污染特性.

**关键词:** 全氟辛烷磺酸类物质 (perfluorooctane sulphonate, PFOS); 水体; 底泥; 污染特性

**中图分类号:** X 132

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-2861(2013)05-0454-05

## Pollution of PFOS in Domestic and International Water and Sediment

SUN Rui, WU Ming-hong, XU Gang, LIU Ning

(School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** Perfluorooctane sulphonate (PFOS) is a new type of persistent organic contaminants caused by human living and detected throughout the world. PFOS enters into the environment through fluorine-containing wastewater treatment plant discharges, industrial production of PFOS or its precursors, atmospheric deposition, etc. It is mainly distributed in water and sediments. The PFOS contamination occurs mainly in densely populated and industrialized regions, and areas surrounded water treatment plants. The adsorption of PFOS is affected by pH, cation or anion surfactants, and concentration of salts. This paper analyzes recent domestic and international literature and studies PFOS to give a summary of PFOS pollution characteristics in water and sediment environments.

**Key words:** perfluorooctane sulphonate (PFOS); water; sediment; pollution characteristics

全氟化合物是一类在全球工业和生活中普遍应用的有机物, 至今已有半个多世纪的历史<sup>[1]</sup>. 全氟类化合物含有碳氟键, 由于氟是电负性最强的元素, 在化学键中吸引电子, 同时碳氟键具有强极性和强度 ( $460.548 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ), 因此全氟化合物在一般环境条件下极抗水解, 具有热稳定性, 难以生物、化学和光化学降解<sup>[2]</sup>. 在环境中, 全氟化合物以全氟辛酸类 (perfluorooctanoic acid, PFOA) 和全氟辛烷磺酸类 (perfluorooctane sulphonate, PFOS) 为主要环境检测物质. PFOS 污染物具有独特的理化性质, 表面活性高, 化学稳定性好, 具有抗酸性, 因此被广泛应用于产

品生产和工业制造过程. 例如, 用于泡沫灭火器, 地毯、皮革、化纤品等室内装潢涂层, 工业和家庭清洁产品, 农药以及杀虫剂, 照相印刷行业, 半导体生产, 水压流体以及金属镀层<sup>[3]</sup>. 2010年, PFOS 作为环境中持久性有机污染物被加入了 Stockholm 公约<sup>[4-5]</sup>. 2003年, 我国为了适应生活需要以及出口贸易, 将 PFOS 大量用于电镀金属、灭火泡沫制造、印刷业、半导体及航空工业, 使得当年的 PFOS 生产量显著增加. 2010年, 我国总的 PFOS 排放量为  $70 \text{ t}$ <sup>[6]</sup>. 然而, PFOS 在动物实验中发现其具有慢性和亚慢性毒性的影响, 包括肝脏毒性、发育毒性以及致癌能力和荷尔蒙影响. 在老

收稿日期: 2013-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11025526, 31100376, 11175112)

通信作者: 吴明红(1968—), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为污染物检测分析和治理与新兴材料制备.

E-mail: mhwu@staff.shu.edu.cn

鼠子宫内进行 PFOS 攻毒, 观察到老鼠下一代的体重明显下降且神经发育迟缓<sup>[7]</sup>. PFOS 容易分配到动物的内脏中, 尤其是肝脏中<sup>[8]</sup>. 2008 年, 欧洲食品安全通过官方实验建立了 PFOS 的日摄入允许量 (tolerable daily intake, TDI) 为 0.150 ng/g. 2009 年, 美国环保署发布短期健康建议允许值, 即饮用水或皮肤接触土壤和生物颗粒中 PFOS 浓度为 200 ng/L 以下<sup>[7]</sup>.

据统计, 国际上含氟表面活性剂的生产主要集中于美国的 3M 公司、杜邦公司, 英国的 ICI 公司, 法国的 Arkoma 公司, 德国的 Hochtst 公司、Bayer 公司, 瑞士的 Ciba-Geigy 公司, 日本大金、大日本油墨、Neos 公司等<sup>[9]</sup>. 我国最初合成碳氟表面活性剂的单位主要有中科院上海有机化学研究所和上海市有机氟材料研究所. 据调查, 我国曾经或正在批量生产 PFOS 类物质的企业共 10 多家, 生产量较大. 另外, 我国全氟类表面活性剂的年进口量较大, 主要作为助焊剂用于电子半导体的生产, 其中含有 PFOS 类物质. 例如美国 3M 公司曾向中国输入 3 种 PFOS, 用于家具的清洗和保护、生产密封圈和地板打蜡等. 虽然国际上很多国家和地区陆续出台相关措施减少环境中 PFOS 的污染, 但是多年积累效应及经济发展不平衡的现状使当前 PFOS 污染未能得到很大缓解. 因此, PFOS 的污染现状和相关毒理、处理技术已成为当下的研究热点. 污染现状及特性研究是进一步进行风险评价和制定治理方针的基本前提, 因此本研究综述了国内外 PFOS 在水体环境和底泥环境中的分布情况, 分析了现阶段我国 PFOS 类污染物污染特性.

## 1 水体中 PFOS 的污染特性

### 1.1 我国水环境中 PFOS 的污染特性

全氟化合物中的 PFOS 是水溶性的, 主要存在于水体中<sup>[10]</sup>. 我国作为 PFOS 生产应用大国, 其含量也引起了科研关注. 滇池水体中的 PFOS 平均浓度为 7.78 ng/L<sup>[11]</sup>, 白洋淀水体中的 PFOS 浓度为 0.11~1.48 ng/L, 平均浓度为 0.53 ng/L<sup>[12]</sup>, 白洋淀水体中的 PFOS 主要来自于周边工业污水的排放. 淮河流域水体中的 PFOS 平均浓度为 4.7 ng/L, 太湖流域的 PFOS 平均浓度为 15 ng/L<sup>[13]</sup>. 官厅水库中 PFOS 浓度在低于最低检测限至 0.52 ng/L, 平均浓度为 0.16 ng/L; 呼和浩特地表水中的 PFOS 浓度在低于最低检测限至 1.1 ng/L, 平均浓度为 0.32 ng/L; 山西水体中的 PFOS 浓度在低于最低检测限至 5.7 ng/L, 平均浓度为 0.93 ng/L; 天津水体中的 PFOS 浓度为 0.09~11.00 ng/L, 平均浓度为 2.6 ng/L; 辽宁水体中的 PFOS 浓度在低于最低检测限至 31 ng/L, 平均浓度为 4.7 ng/L<sup>[14]</sup>. 同时, 在我国近海海域中, 大连海岸

区域表层海水中的 PFOS 浓度为 0.1~0.2 ng/L<sup>[15]</sup>, 温州市近海海水中普遍存在 PFOS 类污染, 并且其浓度为 1.00 ng/L 以下至 31.36 ng/L, 中位浓度为 2.29 ng/L<sup>[16]</sup>, 长江入海口水体中 PFOS 浓度为 0.62~14.00 ng/L, 而上海表层海水的 PFOS 浓度为 52.6 ng/L<sup>[17]</sup>. 大连海岸的 PFOS 污染源可能主要为污水厂排水及人居废物. 经分析, 污水厂的进水中来自生活污水的 PFOS 浓度为 1.8~176.0 ng/L, 而 70% 混合污水中的工业污水 PFOS 浓度仅为 2.6~9.5 ng/L; 沿海污水厂出水中的 PFOS 浓度为 1.1~74.8 ng/L<sup>[15]</sup>. 我国主要区域水体中的 PFOS 浓度分布如表 1 所示.

表 1 我国主要区域水体中 PFOS 浓度分布

Table 1 PFOS concentration distribution of major regional water bodies

水体区域	最低浓度/ (ng·L <sup>-1</sup> )	最高浓度/ (ng·L <sup>-1</sup> )	平均浓度/ (ng·L <sup>-1</sup> )
云南滇池 <sup>[11]</sup>	—	—	7.78
河北白洋淀 <sup>[12]</sup>	0.11	1.48	0.53
淮河流域 <sup>[13]</sup>	—	—	4.70
太湖流域 <sup>[13]</sup>	—	—	15.00
河北官厅水库 <sup>[14]</sup>	未检出	0.52	0.16
呼和浩特 <sup>[14]</sup>	未检出	1.10	0.32
山西 <sup>[14]</sup>	未检出	5.70	0.93
天津 <sup>[14]</sup>	0.09	11.00	2.60
辽宁 <sup>[14]</sup>	未检出	31.00	4.70
大连海岸 <sup>[15]</sup>	0.10	0.20	—
温州近海 <sup>[16]</sup>	<1.00	31.36	2.29
长江入海口 <sup>[17]</sup>	0.62	14.00	—

### 1.2 国外水环境中 PFOS 污染特性

北美地区是最早关注 PFOS 污染的区域. 3M 公司针对美国田纳西州水体中 PFOS 浓度进行测量, 在有污水处理设施排污口的 Baker 溪流上下游进行分析, 通过液相质谱方法测量得到 PFOS 在上游的浓度为 32 ng/L, 点源排放的下游浓度为 114 ng/L<sup>[18]</sup>. 同时, Lindstrom 等<sup>[18]</sup>在第开特地区进行采样分析, 检测到两个饮用水样品中的 PFOS 浓度为 12.0~14.1 ng/L, 并发现第开特地区的 PFOS 类污染主要是由于该地区利用含有全氟类化合物的剩余污泥改良土壤性质并经土壤渗透转移到地下水及表层水体中造成的. 加拿大温哥华都市化海港福溪水体中的 PFOS 浓度为 170~710 pg/L<sup>[19]</sup>. 美国明尼苏达州一个旧垃圾处置场的地下水中 PFOS 浓度为 3 000 μg/L, 同时受其影响, 在该州无明显点源污染处也检测到了低含量的 PFOS<sup>[20]</sup>. 在大西洋水体中, PFOS 是主要的全氟烃基酸类污染物之一, 加拿大北极地区从南格林兰岛到兰开斯特海峡水体中的 PFOS 平均浓度为 17 pg/L,

从加拿大群岛中部至楚科奇海的 PFOS 平均浓度为 13 pg/L. 欧洲海岸区和美国东部的 PFOS 浓度为 190 pg/L, 北极格陵兰岛至白令海峡的 PFOS 浓度在低于最低检测限至 39 pg/L. 分析南赤道地区的 PFOS 来源, 可能是由于南美地区持续使用生产全氟辛基磺酰氟(perfluorooctanesulfonyl fluoride, PFOSF) 基础材料, 导致 PFOS 浓度为 18~170 pg/L<sup>[21]</sup>.

欧洲地区 PFOS 检测覆盖面很广. 据估计, 在欧洲的大部分河流中, PFOS 的平均浓度为 6 ng/L<sup>[10]</sup>. 同时, 研究者大多认为污水厂排放的污水是该区域 PFOS 进入环境水体的重要点源途径. Llorca 等<sup>[7]</sup>发现, 在西班牙表层河流样品中, PFOS 的平均浓度为 264 ng/L, 德国表层河流样品中 PFOS 的平均浓度为 2.1 ng/L. 分析发现, 这是由于西班牙地区采样点处为高度工业化城市, 同时污水厂排放污水的 PFOS 平均浓度为 214 ng/L, 而在德国, 污水厂检测的浓度低于方法检测浓度. Llorca 等<sup>[7]</sup>还对德国及西班牙瓶装矿泉水和自来水进行了 PFOS 浓度分析, 发现德国瓶装水的 PFOS 浓度为 1.0 ng/L, 西班牙的低于实验方法的最低检测限; 德国自来水中的 PFOS 平均浓度为 0.4 ng/L, 西班牙自来水为 46 ng/L. Pico 等<sup>[22]</sup>在西班牙瓦伦西亚的 L'Albufera 自然公园水体中检测到 PFOS 浓度为 0.94~58.10 ng/L, 荷兰表层水体样品中 PFOS 浓度为 3.3~25.4 ng/L<sup>[23]</sup>. Cristian 等<sup>[24]</sup>对西班牙地区的 PFOS 分布研究发现, 由于西班牙北部的港口活动很多, 例如商贸交易、捕鱼业、浴场活动等, 因此受船舶停留和维修直接污染, 同时该地区也是城市雨水污水排放地, 其 PFOS 在水体中的浓度为 0.01~6.57 ng/L, 加泰罗尼亚海岸水体中的 PFOS 浓度为 0.087~8.380 ng/L. 捷克共和国 Svitava 和 Svatka 河流水体中的 PFOS 浓度为 0.6~12.3 ng/mL<sup>[25]</sup>. 英吉利海峡中 PFOS 浓度为 130 pg/L<sup>[26]</sup>, 其污染主要来自海流运动及部分大气沉降.

亚洲地区除我国外, 韩国、日本等也进行了部分研究. 韩国的西海岸是亚洲工业化和城市化区域, 拥有百万人口, 对于工业和旅游业十分重要. Benskin 等<sup>[21]</sup>对韩国西海岸水体进行了检测, 得到 PFOS 浓度为 0.35~47.00 ng/L, 平均浓度为 8.7 ng/L. Kim 等<sup>[27]</sup>在 2005—2010 年期间对韩国 8 条主要流域的 PFOS 浓度进行检测, 得到其浓度分布在未检出至 651 ng/L, 平均浓度为 5.70 ng/L, 污染方式以面源为主. 日本东京湾流域的 PFOS 浓度为 0~60.0 ng/L<sup>[28]</sup>.

### 1.3 我国现阶段水环境中 PFOS 污染的水平

我国与 PFOS 相关的工业是水环境中 PFOS 污染的重要来源, 电镀金属工业用 PFOS 是最大的 PFOS 污染源, 其次为纺织工业、灭火工业、PFOS 生产制

造业和半导体工业. 从地域来说, 在我国东部大部分省市, 金属电镀和纺织业导致水环境中 PFOS 污染严重. 同时在西部地区和一些东北省市灭火工业是主要的污染来源<sup>[6]</sup>. 从亚洲地区看, 我国水环境的 PFOS 污染水平相比于韩国、日本属于中等偏上水平. 从世界范围来看, 我国水环境的 PFOS 的污染属于中等水平. Chimeddulam 等<sup>[29]</sup>研究了水体使用而造成的平均人体接触 PFOS 浓度值, 成年人为每天 0.16~220.15 ng/kg 体重, 儿童为每天 0.13~354.30 ng/kg 体重, 并且 1~3 岁幼龄儿童和居住在全氟化合物污染区域的居民受 PFOS 危害的影响较大. Pan 等<sup>[17]</sup>研究得出上海自来水中 PFOS 含量为 7.6 ng/L, 高于德国自来水中 PFOS 浓度, 但在美国环保署发布短期健康建议允许值 200 ng/L 以下.

## 2 底泥中 PFOS 污染特性

### 2.1 我国底泥环境中 PFOS 污染的特性

随着现阶段研究的不断深入, 人们发现底泥对于 PFOS 具有一定的吸附能力, 可作为 PFOS 的最终环境归宿之一. 我国滇池底泥样品中, PFOS 是主要的全氟化合物污染物, 浓度为 0.07~0.83 ng/g 干重<sup>[11]</sup>. 白洋淀底泥中的 PFOS 浓度为 0.06~0.64 ng/g 干重, 平均浓度为 0.19 ng/g 干重, 工业污水的排放是其主要的污染来源<sup>[12]</sup>. 天津市大黄堡湿地底泥中的 PFOS 浓度为 0.54~1.10 ng/g 干重<sup>[8]</sup>. Bao 等<sup>[30]</sup>以珠江为主, 对珠江及黄浦江中底泥的 PFOS 浓度进行检测分析, 发现在珠江底泥中, PFOS 浓度在低于最低检测限至 3.1 ng/g 干重, 平均浓度为 0.58 ng/g 干重; 在黄浦江底泥中, PFOS 浓度在低于最低检测限至 0.46 ng/g 干重, 平均浓度为 0.11 ng/g 干重. 同时, Li 等<sup>[2]</sup>以黄浦江为主要研究对象, 得到上海黄浦江底泥中 PFOS 浓度为 1.57~8.70 ng/g 干重. 长江口底泥中 PFOS 浓度为 72.9~536.7 ng/g 干重<sup>[17]</sup>. 我国之前的研究重点倾向于水体、降水、生物体以及非直接暴露型人群的全氟化合物含量, 因而对于底泥中 PFOS 的研究尚处于初级阶段.

### 2.2 国外底泥环境中 PFOS 污染的特性

类似于国内, 国外对于底泥中 PFOS 的研究正逐步增多. 西班牙瓦伦西亚 L'Albufera 自然公园底泥中 PFOS 的浓度为 0.10~4.80 ng/g 干重<sup>[22]</sup>. 日本 Kogaigawa, Sakuragawa, Tokyo Bay 三处底泥中的 PFOS 浓度分别为 28, 288, 145 pg/g 干重<sup>[31]</sup>. PFOS 在印度恒河底泥中的浓度总是低于最低检测限, 小于 0.5 ng/g 干重<sup>[32]</sup>. 印尼沿海域雅加达湾底泥中的 PFOS 浓度为 0.90~3.7  $\mu\text{g}/\text{kg}$  干重, 该区域污染以面源污染为主, 主要有港口船舶、工业生产及人为因

素<sup>[33]</sup>. 西班牙坎塔布连海水底泥中的 PFOS 浓度很低, 未明显检出, 同日本九州底泥中 PFOS 含量 (0.09~0.14 ng/g 干重)<sup>[24]</sup>类似. 荷兰底泥样品中 PFOS 浓度为 0.07~1.90 ng/g 干重<sup>[23]</sup>. 韩国西海岸底泥中 PFOS 浓度为 0.2 ng/g 以下至 5.8 ng/g 干重, 平均浓度为 1.5 ng/g 干重<sup>[34]</sup>. 澳大利亚悉尼港口底泥中的 PFOS 浓度为 0.80~6.20 ng/g 干重, 平均浓度为 2.1 ng/L, 其污染主要是源于当地直接的污染源<sup>[4]</sup>. 加拿大温哥华都市化的海港福溪底泥中 PFOS 浓度为 71~180 pg/g 干重<sup>[19]</sup>.

### 2.3 我国现阶段底泥环境中 PFOS 污染的特性

我国底泥中 PFOS 的含量在世界范围内属于中等偏下水平, 但同时还应考虑到环境对于水相和底泥中 PFOS 浓度分配的影响. 贾成霞等<sup>[35]</sup>研究发现, PFOS 在底泥中的吸附量随 pH 值的升高呈先降低后增加的趋势, 吸附量在中性范围最低, 碱性和酸性范围升高, 在酸性和碱性环境中, 氢键和配体交换机理分别占主导. 当有阳离子表面活性剂溴化十六烷三甲基铵 (CTAB) 或阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠 (SDBS) 存在时, CTAB 可显著增加 PFOS 在底泥中的吸附浓度, 而 SDBS 对于 PFOS 在底泥中的浓度影响取决于活性剂浓度, 它既可以促进 PFOS 吸附于底泥中, 又能够使 PFOS 溶解于水中<sup>[36]</sup>. 从国内的数据可以很明显观察到, 长江口处底泥中的 PFOS 浓度最大, 这是由于盐度的变化, 使长江口水体中的 PFOS 大量转移到底泥中. 研究表明, 在低盐度区域, PFOS 浓度在水体中较高而在底泥中较低; 在高盐度区域, PFOS 浓度在底泥中较高而在水体中较低<sup>[17]</sup>, 并且当海水水体中 PFOS 浓度为 10  $\mu\text{g/L}$  时, PFOS 吸附于底泥中的浓度随水体盐度的增加而增加<sup>[37]</sup>.

## 3 结束语

综上所述可以看出, 我国 PFOS 类物质的污染大体处于中等水平范围, 污染状况还是比较严重的. 我国的 PFOS 研究起步较晚, 目前对污染现状的研究还不够全面, 只在部分水体及少量的底泥环境中进行了初步检测. 同时, 我国尚未建立污水处理厂关于 PFOS 的排放标准以及饮用水中的含量阈值. 从文献调研中发现, PFOS 类物质分布不均匀, 但是在人口密度大的区域、工业化程度高的城市, 或是有点状污染源 (如污水处理厂排水) 的地区其浓度偏大, 说明 PFOS 污染与这些因素密切相关. 对于偏远地区, 通过大气沉降、洋流、冰川融化等方式导致 PFOS 长距离迁移. 如今, 短链全氟酸类应用将代替 PFOS 类物质, 但是其可能带来的危险性尚未考察<sup>[7]</sup>. 与此同时, 我国也在逐步淘汰仍用于个别行业的 PFOS 物质<sup>[10]</sup>, 减少 PFOS 排放, 从源头控制其对环境造成的污染.

## 参考文献:

- [1] OECD. Hazard assessment of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and its salts [EB/OL]. [2013-04-28]. <http://www.oecd.org/dataoecd/23/18/2382880.pdf>.
- [2] LI F, ZHANG C, QU Y, et al. Quantitative characterization of short- and long-chain perfluorinated acids in solid matrices in Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408: 617-623.
- [3] ZHANG L, LIU J, HU J, et al. The inventory of sources, environmental releases and risk assessment for perfluorooctane sulfonate in China [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 165: 193-198.
- [4] THOMPSON J, ROACH A, EAGLESHAM G, et al. Perfluorinated alkyl acids in water, sediment and wildlife from Sydney Harbour and surroundings [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62: 2869-2875.
- [5] WANG T, WANG Y, LIAO C, et al. Perspectives on the inclusion of perfluorooctane sulfonate into the Stockholm convention on persistent organic pollutants [J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 43: 5171-5175.
- [6] XIE S, WANG T, LIU S, et al. Industrial source identification and emission estimation of perfluorooctane sulfonate in China [J]. *Environment International*, 2013, 52: 1-8.
- [7] LLORCA M, FARRÉ M, PICÒ Y, et al. Analysis of perfluoroalkyl substances in waters from Germany and Spain [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 431: 139-150.
- [8] 李法松, 何娜, 覃雪波, 等. 全氟化合物在天津大黄堡湿地多介质分布研究 [J]. *环境化学*, 2011, 30(3): 638-643.
- [9] 梅胜放. 我国 PFOS/PFOA 的生产、应用以及国内外标准现状 [J]. *有机氯工业*, 2008, 1(1): 21-25.
- [10] PAUL G A, SCHERINGER M, HUNGERBÜHLER K, et al. Estimating the aquatic emissions and fate of perfluorooctane sulfonate (PFOS) into the river Rhine [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012, 14: 524-530.
- [11] ZHANG Y, MENG W, GUO C, et al. Determination and partitioning behavior of perfluoroalkyl carboxylic acids and perfluorooctane sulfonate in water and sediment from Dianchi Lake, China [J]. *Chemosphere*, 2012, 88: 1292-1299.
- [12] SHI Y, PAN Y, WANG J, et al. Distribution of perfluorinated compounds in water, sediment, biota and floating plants in Baiyangdian Lake, China [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012, 14: 636-642.
- [13] YU N, SHI W, ZHANG B, et al. Occurrence of perfluoroalkyl acids including perfluorooctane sulfonate isomers in Huai River Basin and Taihu Lake in Jiangsu

- Province, China [J]. *Environ Sci Technol*, 2013, 47: 710-717.
- [14] WANG T, KHIM S J, CHEN C, et al. Perfluorinated compounds in surface waters from Northern China: comparison to level of industrialization [J]. *Environment International*, 2012, 42: 37-46.
- [15] CHEN H, ZHANG C, HAN J, et al. PFOS and PFOA in influents, effluents, and biosolids of Chinese wastewater treatment plants and effluent-receiving marine environments [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 170: 26-31.
- [16] 赵淑江, 曹培, 朱诚侃, 等. 温州近海海域海水及滩涂沉积物中 PFOS 和 PFOA 污染特征分析[J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(2): 221-224.
- [17] PAN G, YOU C. Sediment-water distribution of perfluorooctane sulfonate (PFOS) in Yangtze River Estuary [J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158: 1363-1367.
- [18] LINDSTROM B A, STRYNAR J M, DELINSKY D A, et al. Application of WWTP biosolids and resulting perfluorinated compound contamination of surface and well water in Decatur, Alabama, USA [J]. *Environ Sci Technol*, 2011, 45: 8015-8021.
- [19] BENSKIN P J, IKONOMOU G M, GOBAS A P C F, et al. Observation of a novel PFOS-precursor, the perfluorooctane sulfonamido ethanol-based phosphate (SAmPAP) diester, in marine sediments [J]. *Environ Sci Technol*, 2012, 46: 6505-6514.
- [20] FERREY L M, WILSON T J, ADAIR C, et al. Behavior and fate of PFOA and PFOS in sandy aquifer sediment [J]. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 2012, 32: 63-71.
- [21] BENSKIN P J, MUIR C G D, SCOTT F B, et al. Perfluoroalkyl acids in the Atlantic and Canadian Arctic Oceans [J]. *Environ Sci Technol*, 2012, 46: 5815-5823.
- [22] PICO Y, BLASCO C, FARRÉ M, et al. Occurrence of perfluorinated compounds in water and sediment of L'Albufera Natural Park(València, Spain) [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2012, 19: 946-957.
- [23] ESPARZA X, MOYANO E, DE BOER J, et al. Analysis of perfluorinated phosphonic acids and perfluorooctane sulfonic acid in water, sludge and sediment by LC-MS/MS [J]. *Talanta*, 2011, 86: 329-336.
- [24] GÓMEZ C, VICENTE J, ECHAVARRI-ERASUN B, et al. Occurrence of perfluorinated compounds in water, sediment and mussels from the Cantabrian Sea (North Spain) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62: 948-955.
- [25] KOVAROVA J, MARSALEK P, BLAHOVA J, et al. Occurrence of perfluoroalkyl substances in fish and water from the Svitava and Svatka Rivers, Czech Republic [J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2012, 88: 456-460.
- [26] ZHAO Z, XIE Z Y, MÖLLER A, et al. Distribution and long-range transport of polyfluoroalkyl substances in the Arctic, Atlantic Ocean and Antarctic coast [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 170: 71-77.
- [27] KIM S K. Watershed-based riverine discharge loads and emission factor of perfluorinated surfactants in Korean peninsula [J]. *Chemosphere*, 2012, 89: 995-1002.
- [28] ZUSHI Y, MASUNAGA S. GIS-based source identification and apportionment of diffuse water pollution: perfluorinated compound pollution in the Tokyo Bay basin [J]. *Chemosphere*, 2011, 85: 1340-1346.
- [29] CHIMEDDULAM D, WU K Y. River water contaminated with perfluorinated compounds potentially posing the greatest risk to young children [J]. *Chemosphere*, 2013, 90: 1617-1624.
- [30] BAO J, LIU W, JIN Y H, et al. Perfluorinated compounds in urban river sediments from Guangzhou and Shanghai of China [J]. *Chemosphere*, 2010, 80: 123-130.
- [31] AHRENS L, YEUNG W Y L, TANIYASU S, et al. Partitioning of perfluorooctanoate (PFOA), perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctane sulfonamide (PFOSA) between water and sediment [J]. *Chemosphere*, 2011, 85: 731-737.
- [32] CORSOLINI S, SARKAR K S, GUERRANTI C, et al. Perfluorinated compounds in surficial sediments of the Ganges River and adjacent Sundarban mangrove wetland, India [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64: 2829-2833.
- [33] HARINO H, ARIFIN Z, RUMENGAN F M I, et al. Distribution of antifouling biocides and perfluoroalkyl compounds in sediments from selected locations in Indonesian coastal waters [J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2012, 63: 13-21.
- [34] NAILE E J, KHIM S J, HONG S J, et al. Distributions and bioconcentration characteristics of perfluorinated compounds in environmental samples collected from the west coast of Korea [J]. *Chemosphere*, 2013, 90: 387-394.
- [35] 贾成霞, 潘纲, 陈灏. 全氟辛烷磺酸盐在天然水体沉积物中的吸附-解吸行为 [J]. *环境科学学报*, 2006, 26(10): 1611-1617.
- [36] PAN G, JIA C X, ZHAO D Y, et al. Effect of cationic and anionic surfactants on the sorption and desorption of perfluorooctane sulfonate (PFOS) on natural sediments [J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157: 325-330.
- [37] CHEN H, ZHANG C, YU Y X, et al. Sorption of perfluorooctane sulfonate(PFOS) on marine sediments [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64: 902-905.